

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Piotra Zawala pt.:
Efekty neuromimetyczne w perowskitach i ich analogach
tytuł ang.: Neuromimetic effects in perovskites and their analogues**

Rozprawa doktorska mgr Piotra Zawala pt.: „Efekty neuromimetyczne w perowskitach i ich analogach”, napisana pod kierunkiem profesorów Konrada Szaciłowskiego i Grzegorza Hessa, poświęcona jest badaniom nad elementami z pamięcią oporu elektrycznego oraz możliwością ich wykorzystania jako sztucznych synaps w układach przetwarzających informacje. Tematyka rozprawy wpisuje się w coraz szerszy nurt badań nad alternatywnymi do architektury von Neumanna strategiami przetwarzania informacji. Materiały opisane w rozprawie mają potencjał aplikacyjny i mogą znaleźć zastosowanie w nowej generacji analogowych układów scalonych realizujących wybrane funkcje.

Rozprawa została przedstawiona w formie zbioru 6 publikacji oraz jednego manuskryptu przygotowywanego do druku. Wszystkie publikacje są wieloautorские, a zostały napisane przez od 3 do 11 współautorów. Trzy z publikacji składających się na rozprawę mają charakter przeglądowy, a trzy pozostałe oraz manuskrypt opisują wyniki oryginalnych badań eksperymentalnych włączając te, które były uzyskane przez autora rozprawy.

Zbiór publikacji poprzedzony jest prawie stu-stronicowym autoreferatem składającym się z 3 rozdziałów.

W pierwszym rozdziale autoreferatu doktorant opisał podstawowe pojęcia używane w rozprawie, sklasyfikował mechanizmy przełączania rezystywnego, opisał materiały, które badał oraz zdefiniował pojęcie plastyczności synaptycznej. W końcowej części tego rozdziału opisał cel badań, którym było: „powiązanie własności fizykochemicznych cienkich warstw perowskitów i materiałów do nich analogicznych z efektami neuromimetycznymi oraz zbadanie możliwości odtworzenia efektów neuromimetycznych w tych materiałach”. Jest to ambitny problem, którego rozwiązanie pozwoliłoby na precyzyjne dobieranie ośrodka przetwarzającego informacje do konkretnego zastosowania.

Drugi rozdział składa się z 7 podrozdziałów przyporządkowanych artykułom

składającym się na rozprawę. Każdy z nich jest streszczeniem fragmentów artykułu, w których przygotowaniu mgr Piotr Zawal uczestniczył albo opisuje wyniki pomiarów przeprowadzonych i zanalizowanych przez niego. I tak:

- podrozdział #1 poświęcony jest właściwościom optoelektronicznym perowskitów oraz związkom pomiędzy tymi własnościami a strukturą materiałów. Ciekawym opisanym zjawiskiem jest kontrola przerwy wzbronionej poprzez zmianę wymiarowości perowskitu związaną z liczbą rozdzielających warstw nieorganicznych.

- podrozdziały #2 i #3 skupiają się na potencjalnym zastosowaniu elementów z pamięcią oporu elektrycznego do przetwarzania informacji. W podrozdziale #2 przedyskutowano możliwość ich wykorzystania do fizycznej implementacji funkcji nieklonowalnych, a w podrozdziale #3 przedstawiono ideę szybkiego wykonywania operacji wektorowych.

- podrozdziały #4-#7 streszczają wyniki prac eksperymentalnych doktoranta, w których badano właściwości rezystywne i neuromimetyczne materiałów perowskitowych i pokrewnych oraz opisano mechanizmy fizyczne leżące u podstaw tych własności. W podrozdziale #4 przedmiotem badań był jodobizmutan metyloamoniowy (MABiI) oraz jego charakterystyka spektroskopowa. W podrozdziale #5 przedstawiono charakterystykę materiałową i rezystywną grupy związków kompleksowych bizmutu z dużymi ligandami organicznymi. Pokazano, że układy oparte o te związki z elektrodami Cu i Au wykazują przeciwne charaktery uczenia hebbowskiego. Podrozdział #6 streszcza wyniki badań nad sztuczną synapsą zbudowaną z metyloamoniowego jodku ołowiu, w którym umieszczono dodatkową warstwę nanocząstek azotku węgla. Obecność tej warstwy pozwoliła na określenie stanu rezystywnego złącza w sposób mało inwazyjny za pomocą światła. W podrozdziale #7 przedstawiono wyniki badań nad układami opartymi o jodobizmutan butyloamoniowy, w którym przejście ze stanu o dużym oporze do stanu o małym oporze jest wynikiem utworzenia filamentu przewodzącego po przyłożeniu napięcia. Wyłączenie napięcia przywraca stan o dużym oporze. Wyniki eksperymentów opisano modelem matematycznym. Wykorzystując ten model współautorzy manuskryptu przeprowadzili optymalizację sieci neuronowej tak, aby rozpoznawała odręcznie pisane cyfry.

Autoreferat kończy podsumowanie oraz spis literatury. Cytowana literatura składa się ze 120 pozycji i w mojej opinii uwzględnia niezbędne pozycje.

W mojej opinii autoreferat został napisany starannie, niemniej pozwolę sobie na kilka uwag krytycznych:

- Autor używa wielu skrótów i nie zawsze (np. ITO) są one zdefiniowane w miejscu gdzie po raz pierwszy się pojawiają. Przydałaby się lista skrótów.

- Uważam, że o ile to możliwe, każdy z podrozdziałów rozdziału 2 autoreferatu powinien kończyć się stwierdzeniem autora, które części załączonego artykułu zostały przez niego napisane. Wzorem może tu być oświadczenie prof. Pier Luigi Gentili, który jednoznacznie opisuje wkład doktoranta w prace #2 i #3.

-W streszczeniu i w manuskrypcie #7 jest informacja o przeprowadzeniu symulacji sieci

neuronowej dla modelu leaky integrate-and-fire. Nie znajduje opisu modelu oraz wartości parametrów użytych do symulacji neuronów ani w streszczeniu ani w dołączonym manuskrypcie.

- Nie podoba mi się konwencja podawania autorów cytowanej literatury. Autor rozprawy podaje wszystkich współautorów, gdy jest ich mniej niż czterech, a w przypadku większej liczby zbywa wszystkich poza pierwszym skrótem „i in.”. Uważam że wszyscy współautorzy powinni być cytowani. Tematyka rozprawy to nie badania nad cząstkami elementarnymi gdzie lista współautorów może być dłuższa od treści komunikatu.

I jeszcze kilka drobnych uwag do autoreferatu:

- str. 30: insert na rysunku 1.1 nie został opisany,

- str. 33: piszą o elektrodach inertnych autor ma chyba na myśli złoto (Au) a nie srebro (Ag),

- str. 36: co autor ma na myśli pisząc “**prawie analogowy** charakter zmiany konduktancji podczas przełączania”?

- str. 59: napięcie elektryczne jest różnicą potencjałów więc sformułowanie “przyłożenie napięcia V_c i 0 V pomiędzy“ nie jest poprawne,

- str. 67: z czego była zrobiona jedna z elektrod? – opis na stronie 67 podaje ITO (indium tin oxide), rysunek 2.4 FTO (flurine tin oxide), według publikacji ITO zostało użyte wyłącznie do pomiarów spektroskopowych,

- str. 74: rysunek 2.8: napięcia przejścia podane w opisie nie odpowiadają wartościom na wykresie,

- str. 77: czy zawsze elektrony płyną z metalu do półprzewodnika?

- str. 79: tekst na dole strony, komentarz o przełączaniu zgodnym lub przeciwnym z ruchem wskazówek zegara nie jest zrozumiały bez odwołania się do oryginalnej publikacji,

- str. 81: podsumowanie artykułu #5, “pozwalając na uzyskanie dokładności rozpoznawania odręcznie pisanych cyfr ze zbioru MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology) na poziomie zbliżonym do ludzkich możliwości [119]“ nie jest wynikiem uzyskanym przez autora rozprawy.

- str. 92: w opisie symulacji sieci neuronowej, która ma rozpoznawać cyfry MNIST nie podano jaka była rozdzielczość obrazów (?20x20) i ile stopni szarości uwzględniono.

Nadesłana mi rozprawa zawiera teksty wszystkich publikacji i opublikowane materiały uzupełniające.

Po nich znajdują się oświadczenie prawie wszystkich współautorów (26 stron) w tym jedno anonimowe (z University of Southampton), a drugie zawierające wyjątkowo dokładne określenie wkładu współautorki (16,66 %) co nasuwa to pytanie o zastosowaną metodę szacowania i błąd wyniku. Za współautorkę (p. Maria Lis), z która nie udało się skontaktować, oświadczenie złożył promotor doktoratu.

Lektura rozprawy nasuwa mi kilka pytań, na które autor mógłby odpowiedzieć w czasie obrony:

- W literaturze używa się podobnie brzmiących terminów: memistor oraz memristor. Jaka jest różnica między nimi?

- We wstępie do autoreferatu autor definiuje memrezystencję jako „relację pomiędzy strumieniem pola i ładunkiem” (tekst nad równaniem 1.1). Jakie są argumenty za tym, żeby oporniki z pamięcią oporu nazywać memrystorami?
- Opisane mechanizmy przełączania rezystywnego zawierają czynnik stochastyczny (np. położenie obszaru przejścia fazowego lub kształt filamentu). Na ile powtarzalne są własności synaps badanych przez autora? Czy łatwo byłoby stworzyć powtarzalne macierze połączeń do obliczeń wektorowych opisane w publikacji #3?
- Jaka jest trwałość struktur perowskitowych w czasie? Moje pytanie dotyczy sieci połączeń do generowania “physically unclonable functions”. Przez jaki czas takie urządzenie generuje tę samą funkcję?
- Czy sieci neuronowe zbudowane z układów wykazujących histerezę zależności potencjał/prąd można programować?

Po zapoznaniu się z rozprawą i załączonymi materiałami stwierdzam, że doktorant przeprowadził badania ważne dla dalszego rozwoju niekonwencjonalnych metod przetwarzania informacji. Publikacje w których mgr. Piotr Zawal jest współautorem budzą zainteresowanie i wiele z nich ma ponad 10 cytowań (scopus.com). Hybrydowe organiczno-nieorganiczne perowskity halogenkowe opisane w publikacji #6 stwarzają możliwość kontrolowania efektów rezystywnych i neuromorficznych nie tylko napięciem, ale także za pomocą światła co wydaje się być ważne dla potencjalnych zastosowań.

Chciałbym też dodać, że według podanej informacji mgr Piotr Zawal zdobył doświadczenie w kierowaniu projektami badawczymi (NCN PRELUDIUM 16, 2018/31/N/ST5/03215, Optyczna modulacja efektu memrystywnego w halogenobizmutanach alkiloamonioowych; NCN ETIUDA 8, 2020/36/T/ST5/00421, Efekty neuromimetyczne w perowskitach i ich analogach).

W mojej opinii mgr Piotr Zawal posiada niezbędną wiedzę teoretyczną i praktykę eksperymentalną do samodzielnego kontynuowania pracy naukowej nad zastosowaniem układów charakteryzujących się histerezą charakterystyki napięciowo-prądowej do neuromimetycznego przetwarzania informacji.

Nie mam wątpliwości, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska magistra Piotra Zawala spełnia ustawowe kryteria (art. 187, Dz.U.2022.0.574 t.j. - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce). Wniosuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o dopuszczenie magistra Piotra Zawala do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.

Jerzy Gorecki